



国家科技部攀登 - B 项目

# 青藏高原大气边界层 观测分析与动力学研究

(青藏高原大气科学试验, 1998)

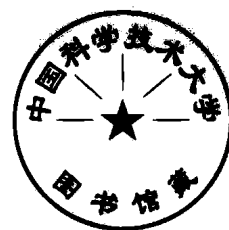
周明煜 徐祥德 卞林根 陈家宜 等著  
刘辉志 张宏昇 李诗明 赵翼俊

气象出版社

# 青藏高原大气边界层观测 分析与动力学研究

(青藏高原大气科学试验, 1998)

周明煜 徐祥德 卞林根 陈家宜 等著  
刘辉志 张宏昇 李诗明 赵翼俊



气象出版社

## 内 容 简 介

本书在国家科委攀登-B“青藏高原地气系统物理过程及其对全球气候和中国灾害性天气影响的观测和理论”项目的青藏高原大气边界层观测试验的基础上,中国气象科学研究院组织有关科学家重点分析和研究了昌都—当雄—改则东西向剖面的高原大气边界层动力和热力特征以及行星边界层综合物理结构。全书共分7章,包括第二次青藏高原科学试验(TIPEX)观测设计和实施、高原近地面层微气象学特征、高原近地面层湍流特征、高原边界层结构特征、高原辐射特征和热源状况、高原对流活动特征、高原边界层综合物理结构等。

本书可供广大气象科技工作者,特别是从事天气与气候变化预测和研究的专家阅读,也可供大气物理、农业生态和环境等学科领域的科研和教学人员参考,还可作为有关专业的硕士、博士研究生的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究/周明煜、  
徐祥德等著. —北京:气象出版社,2000.8

ISBN 7-5029-2966-5

I. 青... II. 周... III. 大气边界层-大气动力学-  
科学实验-理论研究-青藏高原-文集 IV. P421.3-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第36288号

### 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究

周明煜 徐祥德 卞林根 陈家宜 等著

刘辉志 张宏昇 李诗明 赵翼俊

责任编辑:宋 钢 于淑秋 终审:周诗健

封面设计:华 艺 责任技编:刘祥玉 责任校对:李 军

\* \* \*  
气象出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路46号 邮政编码:100081)

北京市白河印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

\* \* \*

开本:787×1092 1/16 印张:8.75 字数:224千字

2000年8月第一版 2000年8月第一次印刷

印数:1~1000

ISBN 7-5029-2966-5/P·1031

定价:50.00元

# 《青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究》

著书人员：

周明煜	徐祥德	卞林根	陈家宜
刘辉志	张宏昇	李诗明	赵翼俊
王继志	索朗多杰	钱粉兰	陈 陟
陆龙骅	罗卫东	李加伦	陈联寿
陶诗言			

## 序 言

青藏高原地处西部地区,约占中国领土四分之一,平均海拔 4000m 以上,是世界上海拔最高、面积最大、地形最为复杂的高原。发生在我国西部青藏高原上复杂的大气运动,不仅关系到高原周边和我国西部地区,还影响到我国东部地区乃至全球的天气气候异常变化。例如,通过科学家分析研究发现,1998 年中国发生的世纪特大洪水的云团系统可一直追溯到西部高原边界层复杂大气活动。

国家攀登-B 高原大气研究项目的科学家们于 1998 年 5~8 月在青藏高原组织实施了第二次大气科学试验,其科学目标是揭示高原地-气物理过程及其边界层(PBL)结构。高原现场大气科学试验完成后,参加该项目实施观测计划的专家们经过团结协作,连续作战,对大量观测数据进行了处理和分析,完成了综合描述高原大气活动特征的理论专著。这本书系统地阐述了青藏高原大气边界层的综合特征,揭示了高原近地面层活跃的大气运动的一些新的观测事实和规律,我们对高原大气活动及其影响等新问题的新认识。

在西部大开发这一世纪壮举正在展开的今天,阐述我国西部高原——世界屋脊上大气活动时空演化特征的《青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究》一书的出版,无疑为揭示高原大气运动特征及其结构的奥秘作出了贡献,也为即将实施的西部大开发大规模行动提供了难得的高原大气特征信息。

我们完成了第二次青藏高原科学试验,取得了可喜的科研成果,但这一试验并未终结,许多神秘的高原大气科学问题有待进一步探索。

最后让我们对参加实施第二次青藏高原现场科学试验及从事高原大气理论研究的科学家和有关科技人员所做的不懈努力表示衷心的感谢,并祝贺本书的出版。

科学技术部副部长



2000 年 7 月 6 日

# 前 言

在国家科技部总体部署与大力支持下,中国气象局、中国科学院大气所以及北京大学、国家海洋局等单位的科学家与科研人员通力协作、精心设计,在与第一次青藏高原气象科学试验相隔将近 20 年的 1998 年,中国科学家再次进行了代号为 TIPEX 的第二次青藏高原大气科学试验。第二次青藏高原大气科学试验的大气边界层综合观测基地共设四个站,即当雄、改则、昌都 and 那曲,这次试验除了有大量的卫星探测资料外,还使用了自动化程度和精度较高的边界层探测仪器,包括大气廓线仪、多普勒声雷达、系留气艇、超声风温仪、光学雨量计、无线电低空探测仪、近地面层微气象梯度观测系统。仅在高原地区投入加密观测的高空站就有 11 个(其中西藏 7 个、青海 3 个、四川 1 个),地面站 12 个(其中西藏 8 个、青海 3 个、四川 1 个),辐射站 6 个(其中西藏 4 个、青海 1 个、四川 1 个)。

第二次青藏高原大气科学试验是在与一系列国际试验(例如 GEWEX)同步的背景下实施的,具有较强的国际合作性质。尤其在高原上 TIPEX 试验与日本科学家同步进行的 GAME/Tibet 试验,成功开展了高原边界层大气科学国际合作研究。

第二次青藏高原现场科学试验结束后,中国气象局气象科学研究所,立即组织有关科学家对现场试验数据进行分析,本书就是高原边界层观测资料的研究成果。

本书共七章,第一章介绍高原大气科学试验 TIPEX 观测实施的设计;第二章介绍青藏高原近地面层微气象学特征;第三章讨论青藏高原近地面层湍流特征;第四章研究高原边界层气象结构特征;第五章介绍青藏高原辐射特征和热状况;第六章讨论高原上的对流活动;第七章是对全书的总结,综合分析了青藏高原近地面层与边界层地-气过程动力和热力结构的综合物理图像。

我们深信,“青藏高原边界层动力学特征”专著对推动高原大气科学领域研究进展及其对全球气候与东亚乃至中国区域性天气气候异常影响理论探讨,具有极为宝贵的科学价值与应用意义。

四大气象科学试验总协调人



2000 年 7 月 2 日

# 目 录

第一章 第二次青藏高原大气科学试验(TIPEX)的观测设计与实施 .....	(1)
1.1 观测试验背景 .....	(1)
1.2 观测试验的科学目标 .....	(2)
1.3 高原野外观测总体设计 .....	(3)
1.3.1 观测系统 .....	(3)
1.3.2 试验区范围 .....	(3)
1.3.3 地面和探空加密观测站 .....	(3)
1.3.4 边界层气象观测基地 .....	(4)
1.3.5 加密观测试验期 .....	(5)
1.4 高原边界层观测技术系统 .....	(5)
1.4.1 湍流观测系统 .....	(5)
1.4.2 梯度和辐射观测系统 .....	(8)
1.4.3 大气廓线探测系统 .....	(10)
1.4.4 多普勒声雷达 .....	(11)
1.4.5 降水观测系统 .....	(12)
1.5 观测质量控制系统 .....	(12)
1.5.1 调试检定 .....	(12)
1.5.2 野外观测比较和试运行 .....	(12)
1.5.3 观测规范、现场技术措施 .....	(13)
1.5.4 试验数据的质量控制 .....	(13)
1.6 资料成果与数据库 .....	(13)
1.6.1 数据库设计 .....	(13)
1.6.2 高原观测资料库 .....	(14)
第二章 青藏高原近地面层微气象学特征 .....	(17)
2.1 近地面层气象要素特征 .....	(17)
2.1.1 高原干季和湿季天气状况 .....	(17)
2.1.2 高原近地面层风速日变化特征 .....	(17)
2.1.3 高原近地面层温度日变化特征 .....	(18)
2.1.4 高原近地面层湿度日变化特征 .....	(20)
2.2 高原近地面层空气动力学参数的确定 .....	(21)
2.2.1 零值位移 $d$ 的估算 .....	(22)
2.2.2 地表粗糙度 $z_0$ 的确定 .....	(22)
2.3 湍流通量的计算及分析 .....	(22)
2.3.1 近地面层通量廓线关系 .....	(23)
2.3.2 湍流通量的确定和特征分析 .....	(24)



2.3.3	高原湍流量计算方法比较	(25)
2.4	青藏高原近地面层风速、温度和湿度廓线	(29)
2.4.1	高原近地面层风速廓线	(29)
2.4.2	高原近地面层温度廓线	(29)
2.4.3	高原近地面层湿度廓线	(29)
2.5	结    论	(34)
第三章	青藏高原近地面层湍流特征	(36)
3.1	高原近地面层湍流谱特征	(36)
3.2	高原近地面层湍流方差特征	(38)
3.2.1	高原近地面层速度方差特征	(38)
3.2.2	高原近地面层温度方差特征	(43)
3.3	高原近地面层通量的时间变化	(46)
3.3.1	高原近地面层通量涡动相关法	(46)
3.3.2	高原近地面层通量的日变化	(46)
3.4	高原近地面层温度和湿度湍流结构参数	(48)
3.4.1	高原近地面层温度结构参数	(48)
3.4.2	高原近地面层湿度结构参数	(51)
3.5	高原近地面层通量整体输送系数	(52)
3.6	结    论	(54)
第四章	青藏高原边界层结构特征	(57)
4.1	高原边界层风速、温度和湿度结构特征	(57)
4.1.1	高原稳定边界层风速、温度和湿度的垂直分布	(57)
4.1.2	高原对流边界层风速、温度和湿度的垂直分布	(59)
4.2	高原边界层气象要素廓线特征及热量、水汽收支	(61)
4.2.1	高原干季风速、温度和湿度廓线	(61)
4.2.2	高原湿季风速、温度和湿度廓线	(63)
4.2.3	高原边界层的热量和水汽收支	(66)
4.3	高原边界层高度	(68)
4.3.1	高原热力边界层	(68)
4.3.2	高原动力边界层	(68)
4.4	高原边界层风速多层结构及低空急流	(72)
4.5	结    论	(77)
第五章	青藏高原辐射特征和热源状况	(79)
5.1	高原总辐射	(79)
5.2	高原地表反射率	(84)
5.3	长波辐射	(86)
5.3.1	高原大气逆辐射	(86)
5.3.2	高原地面长波辐射	(88)
5.3.3	高原有效辐射	(91)
5.4	高原土壤热通量特征	(91)



5.5	高原热源强度	(93)
5.5.1	高原净辐射	(94)
5.5.2	高原热源强度	(95)
5.6	结 论	(98)
第六章	青藏高原边界层对流活动特征	(100)
6.1	高原上的对流现象	(100)
6.1.1	高原对流云系	(100)
6.1.2	高原边界层的对流活动	(100)
6.2	高原边界层对流运动的统计学特征	(103)
6.2.1	高原垂直运动谱	(103)
6.2.2	高原垂直运动频率	(105)
6.3	高原对流运动能量源	(107)
6.4	结 论	(109)
第七章	青藏高原边界层综合物理结构	(111)
7.1	高原近地面层与边界层动力学特征	(111)
7.1.1	高原近地面层微气象结构	(111)
7.1.2	高原近地面层湍流运动	(111)
7.1.3	高原边界层风廓线	(112)
7.1.4	高原 Ekman 螺线	(113)
7.2	高原近地面层水汽状况及其相关特征	(114)
7.2.1	高原近地面层湿度分布特征	(114)
7.2.2	高原近地面层逆湿现象	(114)
7.2.3	高原大气逆辐射与水汽分布	(114)
7.2.4	高原干、湿季降水过程特征	(115)
7.2.5	高原雪盖特征	(115)
7.3	高原近地面层与边界层热力结构	(115)
7.3.1	超太阳常数与全球总辐射极值现象	(115)
7.3.2	高原近地面层热力状态	(116)
7.3.3	高原热源强度	(116)
7.3.4	高原边界层热力混合层特征	(116)
7.3.5	高原边界层动力特征	(117)
7.3.6	高原热对流泡特征及其垂直运动	(117)
7.4	高原云结构特征	(118)
7.4.1	高原“爆米花”云发展及其移动轨迹	(118)
7.4.2	1998 年长江流域特大暴雨过程“云轨迹”特征	(119)
7.5	高原近地面层边界层地-气过程综合物理图像	(119)
后 记		(123)

# OBSERVATIONAL ANALYSIS AND DYNAMIC STUDY OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER ON TIBETAN PLATEAU

## Tibetan Plateau Experiment of Atmospheric Sciences, (TIPEX) 1998

Zhou Mingyu Xu Xiangde Bian Lingen Chen Jiayi  
Liu Huizhi Zhang Hongsheng Li Shiming Zhao Yijun et al.

### CONTENTS

#### Preface

#### Foreword

<b>Chapter 1 Observational design and implement of TIPEX</b> .....	(1)
1.1 Background .....	(1)
1.2 Scientific objective .....	(2)
1.3 Design of field experiment .....	(3)
1.4 Measurement system of atmospheric boundary layer .....	(5)
1.5 Control of data quality .....	(12)
1.6 Database .....	(13)
<b>Chapter 2 Characteristics of micrometeorology in surface layer of the Plateau</b> .....	(17)
2.1 Characteristics of meteorological elements in surface layer .....	(17)
2.2 Aerodynamic parameters in surface layer .....	(21)
2.3 Calculation and analysis of turbulent flux .....	(22)
2.4 Profile of wind velocity and temperature and humidity in surface layer .....	(29)
2.5 Summary .....	(34)
<b>Chapter 3 Turbulent property in surface layer of the Plateau</b> .....	(36)
3.1 Properties of turbulent spectrum in surface layer .....	(36)
3.2 Turbulent variance in surface layer .....	(38)
3.3 Variation of turbulent flux with time in surface layer .....	(46)
3.4 Turbulent structure parameters of temperature and humidity in surface layer .....	(48)
3.5 Flux bulk transfer coefficients in surface layer .....	(52)

3.6	Summary .....	(54)
<b>Chapter 4</b>	<b>Structure of atmospheric boundary layer of the Plateau .....</b>	<b>(57)</b>
4.1	Structure features of wind velocity, temperature and humidity .....	(57)
4.2	Characteristics of profiles for meteorological element and budget of heat and water vapor .....	(61)
4.3	Height of atmospheric boundary layer on the plateau .....	(68)
4.4	Multiple layer structure of vertical distribution for wind velocity and low-level jet .....	(72)
4.5	Summary .....	(77)
<b>Chapter 5</b>	<b>Characteristics of surface radiation and heat source on the plateau .....</b>	<b>(79)</b>
5.1	Global solar radiation .....	(79)
5.2	Surface reflected radiation and albedo .....	(84)
5.3	Surface long-wave radiation .....	(86)
5.4	Soil heat flux .....	(91)
5.5	Heat source strength .....	(93)
5.6	Summary .....	(98)
<b>Chapter 6</b>	<b>Behavior of convection activity in boundary layer of the plateau .....</b>	<b>(100)</b>
6.1	Convective phenomena of the plateau .....	(100)
6.2	Statistical facts of convective motion .....	(103)
6.3	Energy source of convective motion on the plateau .....	(107)
6.4	Summary .....	(109)
<b>Chapter 7</b>	<b>Physical structure of the atmospheric boundary layer on the plateau .....</b>	<b>(111)</b>
7.1	Dynamics in boundary layer on the plateau .....	(111)
7.2	Water vapor distribution and its relevant feature in surface layer .....	(114)
7.3	Thermodynamic structure of boundary layer .....	(115)
7.4	Characteristics of cloud structure on the plateau .....	(118)
7.5	Conceptional model of Physical process between land and atmosphere on the plateau .....	(119)
Postscript	.....	(123)

# 第一章 第二次青藏高原大气科学试验

## (TIPEX)的观测设计与实施

青藏高原占我国领土四分之一,平均高度 4000 余米,是世界上最高、范围最大的高原大地形。大范围异常的高原热力、动力作用及其地-气物理过程对我国东部和南部、亚洲地区乃至全球的气候变化和灾害性天气的形成均有重大影响。但高原上多荒野大漠,人烟稀少,气象观测历史短,测站稀疏,科学家对发生在高原上的气象变化及其影响知之甚少。为了揭开高原边界层的“神秘面纱”,中国科学家在过去 20 年内先后进行了两次高原大气科学试验,并与日本、美国、韩国等国科学家共同开展了多次联合现场观测试验及其科学研究,加深了高原陆气相互作用的物理过程对东亚及全球气候变化和中国区域灾害性天气发生、发展作用机理的了解。

中国第一次青藏高原气象科学试验(QXPME X)于 1979 年 5~8 月举行,与国际大气研究计划全球试验(FGGE)和夏季风试验(MONEX)阶段性同步进行。首次在青藏高原上获得了十分宝贵的各种观测资料,得到了丰富的研究成果,有效地推动了青藏高原气象及其气候影响的理论研究。

在青藏高原进行大气边界层地-气物理过程观测,同时通过现有气象站和增设探空站的加密观测,获取较高时空覆盖的气象资料是第二次青藏高原气象科学试验的重要方面。按照项目制定的计划,于 1998 年 5 月 10 日~8 月 10 日在西藏、青海和四川三个省区 11 个探空站、12 个地面站进行了加密气象观测。此期间还在改则、当雄和昌都三个有代表性的高原实验基地开展大气边界层特殊观测研究。在国家科技部的关心与支持下,中国气象局四大试验总协调人温克刚局长对试验的设计与实施全过程作了总体部署。中国气象局、中国科学院大气所以及北京大学、国家海洋局等单位的科学家与科研人员通力协作、精心设计,中国气象局科教司组织和气象科学研究所牵头实施,西藏自治区气象局、青海省气象局、四川省气象局领导共同协作,首席科学家陶诗言、陈联寿院士以及项目专家委员会科学指导,在气候环境特殊、工作条件异常艰苦的世界屋脊上克服了种种困难,成功地实施了加密观测试验任务,获得了大量可贵的高原边界层资料,并取得了本专著所反映的具有创新意义与宝贵科学价值的高原边界层研究成果。在分析中,又对观测资料的质量进行了检核和质量控制。本章介绍并论述观测的实验设计和资料成果概况。

### 1.1 观测试验背景

自 20 世纪 50 年代起,以叶笃正等<sup>[1]</sup>为首的我国科学家,从动力学和热力学的角度对青藏高原的大气环流作用及其天气气候意义展开了有系统性的科学研究。随着青藏高原气象研究的深入,我国于 1979 年组织实施了一次综合性的“青藏高原气象科学试验”(QXPME X)。通过高原地区增设探空站和 6 个热源观测站及日常探空和地面站的加密观测,获得了亚洲夏季风爆发前后高原及其邻近地区十分宝贵的综合气象资料。以该实验观测资料为基础开展的研究大大促进了有关课题研究的深度和广度,其后取得的成果可分别参见文献[2]及文献[3~5]。还应当指出的是,中国科学院兰州高原大气物理研究所于 1982 年 8 月~1983 年 7 月,在改则、那曲、拉萨、甘孜四个站开展了以冷热源研究为主题的周年观测,也为进一步分析青藏高原

的冷热源特性及其季节性变化提供了有重要价值的补充资料<sup>[6]</sup>。

地面对大气的强迫作用的重要性已被广泛认知。不同尺度的气象模式如何定量地反映高原地表的状态和过程,很自然地便成为本项目研究的核心问题之一。注意到第一次青藏高原气象科学试验及后续工作在高原冷热源的直接观测证据方面已提供了丰富的资料。但是由于条件所限,对发生在高原上的大气边界层地-气物理过程的细节尚缺乏足够的了解。另外,与参数化表达高原地表通量相关的整体输送系数的大小和选值问题也有待于进一步澄清。这些问题都需要从高原现场的第一手观测数据及其分析研究才能解决。随着国内外大气边界层探测技术的提高,目前我国已具备了利用一些新的仪器和方法开展野外观测,为进一步揭示青藏高原上大气边界层的规律和特点提供新资料。

廿年来,青藏高原及其周边地区气象站网的配置已有长足的进步。西藏自治区地面气象站大大增多,且已有五个高空站开展日常探空观测。但是,高原西部阿里地区的广阔地域高空观测站仍处于空白状态,地面气象站也很稀疏。测站密度,特别是探空站的密度不均匀使得发生在高原西部的天气系统难以在观测资料中得到体现。另外,一日两次的(个别站一日一次)的业务探空观测也不足以捕捉高原上经常出现而且有重要意义的中小尺度系统的过程信息。为此,合理地改进探空站的配置,增加观测的日频次也是本此实验的重要任务。

1998年在国家科委(现科技部)和国家自然科学基金委的支持下,与青藏高原项目同时尚有淮河流域能量和水循环研究、南海季风试验和华南暴雨试验及四大气象科学试验开展工作。虽然各项目外场观测的侧重点各有不同,但是,从外场试验的方案制定、准备、实施乃至资料分析都能相互借鉴。特别是四个试验所取得的加密气象观测资料除了覆盖灾害性天气集中出现的江淮和华南之外,还覆盖了这些灾害性天气系统的起源地——青藏高原与南海海域。青藏高原野外试验设计中充分考虑了各大试验同步观测的科学效益,试验时机同步地确定为1998年夏季。研究成果已表明青藏高原天气过程和江淮流域的暴雨之间的内在关联。我们相信,随着工作的进一步开展,四大实验资料的联合使用对我国大气科学研究的深入将显示出其重要作用。

作为国际合作项目,由日本有关大学和研究机构主持的GAME/Tibet与TIPEX有共同的宗旨,双方的合作扩展了高原实验的观测内容,增强设备能力与水平。特别是增加了从青海五道梁到安多那曲一线大气边界层特殊观测站位,既有高原荒漠、高山草甸,又有冰川表面,使高原下垫面的代表性类型更加完整。

众所周知,在青藏高原上进行短期强化观测的最大困难是高原条件和后勤支持的困难。其中有运输、通讯、电力供应及工作人员的生活和安全保障等,也包括内地科技人员的高原适应能力和各种仪表在高原特殊条件下的性能等技术问题,这些都要求从行政和科学角度多方面进行论证安排。在试验设计、试验基地的选勘及确定观测项目和仪器准备各环节,对这些困难的解决方案都做了反复调研和论证,建立相应的对策预案。野外观测实施阶段,从组织机构、现场指挥协调和应急处理几个方面保证了野外试验始终能顺利进行。

## 1.2 观测试验的科学目标

TIPEX野外观测试验的科学目标概括为:获得青藏高原湿季开始前后的季节转换期有合理时空覆盖的高空和地面气象资料。在有代表性的地点开展大气边界层特殊观测,为研究高原边界层和地面过程及其参数化提供基础数据。通过卫星遥感资料的同步收集,改进反演算法,

使卫星遥感资料能科学地应用于高原及周边地区的气象资料同化。通过以上的努力获得可供项目理论研究的新版本资料。

(1) 为促进青藏高原对东亚地区的天气过程,特别是对我国长江流域灾害性天气(如夏季暴雨)和亚洲季风形成演变的作用及对全球气候的影响研究提供优良的气象数据。通过增设高原西部的探空站点和增加各站高空、地面观测的日频次,提高青藏高原核心区域的气象数据质量,以满足项目各课题研究的数据要求。强化野外观测期间常规观测资料与边界层观测基地收集的专门资料相结合,在定性上起到促进对各尺度天气过程和大气环流过程的了解,定量上可丰富数值模式的初始化资料,改进参数化格式。

(2) 在高原不同气候和地面特征有代表性的地点设立若干大气边界层观测实验基地,获取大气边界层地表水热状态和反映其过程的气象要素。其核心内容是地面的动量、感热和潜热通量、地表辐射收支各分量及大气边界层结构和过程的观测。为了解不同类型下垫面与大气相互作用、土壤热力和水分状态也是测量的主要内容。条件具备的基地还围绕云—辐射过程、降水特性、植被二氧化碳输送通量等方面内容开展观测。这些试验结果将促进对高原地—气物理过程机理的了解,为课题理论研究提供大气边界层通量和廓线的参数化方案奠定良好基础。观测资料本身也有助于卫星遥感算法的改进。

(3) 卫星遥感是填补气象站稀疏地区的资料空白和获得地表覆盖和地表气象参数的有效工具。在青藏高原地区充分收集和利用极轨和静止卫星的反演信息也是 TIPEX 观测试验的重要目标。卫星遥感信息与强化的探空站、地面站及边界层观测资料相结合,对现有卫星反演算法在青藏高原的适用性的验证和改进提高有着重要作用。经过这一研究环节取得的遥感气象资料成果将极大地改进高原及其周边地区气象场四维同化的研究和应用。

## 1.3 高原野外观测总体设计

### 1.3.1 观测系统

观测系统主要有:常规天气观测系统、大气边界层观测系统、卫星资料收集系统。

### 1.3.2 试验区范围

进行加密气象观测和边界层地—气过程特殊观测的站点涉及西藏、青海和四川三个省区。试验区范围和观测站点及观测内容见图 1.1(见本章后的彩图)。试验区东起四川西部的甘孜,西至阿里地区的狮泉河,经度跨越  $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ ,北起青海的五道梁,南到定日,覆盖  $28^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$  范围。除藏北无人区因条件所限未能增设站点和开展加密观测外,加密观测站和按常规观测的站点结合起来形成了一个具有合理覆盖的区域性观测网。其中开展加密探空和地面观测及特殊观测的站位大体上沿东西向和北东北—南西南方向呈十字形排列,既有利于获得高原不同气象和地面特征的大气状态资料,又能捕捉到穿越不同方向剖面的气象信息(见本章后的彩图 1.2)。

### 1.3.3 地面和探空加密观测站

为了把握发生在高原不同尺度天气系统演变的资料, TIPEX 试验观测期间,在改则和狮泉河两地增设探空站,与西藏现有 5 个探空站及邻近地区的托托河、玉树、达日(青海)和四川省的甘孜共 11 站进行一日四次的探空加密观测。各站位置示于表 1.1 和图 1.1。在加密探空期间以上各站同时开展一日 24 次地面观测。为配合边界层观测,当雄气象站也加入到加密地面观测站网。此外拉萨、那曲、昌都、狮泉河、玉树和甘孜 6 个辐射站白天各辐射要素的观测也加密为每小时一次。

表 1.1 TIPEX 加密观测期间地面和高空强化观测站

站号	名称	经度 E	纬度 N	气压表海拔高度 m
55591	拉萨	91°08'	29°40'	3650
55299	那曲	92°04'	31°29'	4508
56137	昌都	97°10'	31°09'	3307
56312	林芝	94°28'	29°34'	3001
55664	定日	87°05'	28°38'	4301
55248	改则	84°25'	32°09'	4416
55228	狮泉河	80°05'	32°30'	4297
56046	达日	99°39'	33°45'	3969
56029	玉树	97°01'	33°01'	3682
56004	托托河	92°26'	34°13'	4534
56146	甘孜	100°00'	31°37'	3394
55493	当雄	91°06'	30°29'	4201

\* 当雄气象站没有日常探空业务,为配合边界层观测,IOP 期间进行加密地面气象观测

中日青藏高原季风试验合作项目原在拉萨、那曲、林芝、日喀则布设运行四个自动气象站,连续观测数年。作为更广泛合作的一部分,除在 TIPEX 试验期间延续进行观测外,还在改则和狮泉河各增设一套自动站进行连续观测。

一日四次的探空和在阿里地区增设两个站,增加了探空频数,填补了西部资料的空白,极大改善项目研究区域常规气象资料的时空覆盖质量。初步分析成果已证实,改则和狮泉河两站资料的取得对于提高青藏高原气象资料的同化质量有着关键性的作用。

### 1.3.4 边界层气象观测基地

边界层气象观测站位的设置原则,一是基于青藏高原不同地域、气候和地表特征的代表性考虑;二是力求建立在交通后勤条件相对好的地点(见本章后的彩图 1.3)。按照这两条原则,观测基地选择在昌都、当雄和改则三地(表 1.2)。三个观测基地自东而西横穿试验区中部并依次代表高原东部湿润河谷、中部半干旱过渡带和西部的高寒荒漠三种有代表性的地理气候特征。

表 1.2 边界层观测基地概况

名称	位置	经纬度	海拔高度	地形地表特征	一般观测期	加密观测期
昌都	县城北 5km	31°6'N 97°16'E	3227m	河谷小平坝 草地	5月20日~8月10日	6月1~6日 6月10~15日 6月25~29日
当雄	县城西北 4km	91°02'E 30°29'N	4242m (GPS 实测)	开阔干河谷 沙土卵石裸地	5月20日~7月1日	6月1~6日 6月11~15日 6月23~30日
改则	县城东 7km	84°29'E 32°08'N	4430m	高原荒漠沙 石裸地	6月6日~7月17日	6月10~15日 6月25~29日 7月10~15日



改则边界层观测站(见本章后的彩图 1.4)设在县城以东 7km 处一块东西长约 15km,南北宽 5~7km 的开阔地(32°13'N,84°48'E),海拔高度 4430m。山谷内地势平坦。地表土壤属于高寒山区荒漠土和半荒漠草原土,土层含砂砾高,主要植物为高原针带草和荒漠沙生针带草,植物稀疏且矮小,一般只有几厘米高。观测站的南部及西南方向 2.5~3.5km 处有 100~200m 高度的山脉;北部及西北方向 5~7km 处有低于 100m 高度的小山。

昌都边界层观测站设在昌都郊外南北走向的河谷地段(31°06'N,97°16'E),海拔高度 3227m。观测站西临澜沧江,东西两侧为 200~400m 高的南北走向的连绵山脉,观测站周围地面约 50cm 深的沙渍黄土。5 月下旬起,雨季到来,地表开始有稀疏的杂草生长,6 月末杂草长至约 20cm 高(见本章后的彩图 1.5)。观测站四周景观基本可代表青藏高原东南部地区高山峡谷的地形地貌和植被特征。

当雄边界层观测站选择在当雄镇以西约 4km 处(91°06'E,30°02'N),地处东北—西南走向的河谷地带,海拔高度 4200m。河谷宽约 10km,长约 20 多公里,河谷中央地势较平坦(见本章后的彩图 1.6),土壤为沙石结构,低矮杂草稀疏。在它的南部有一片冬季草场,植被较厚。

根据 TIPEX 和 GAME/Tibet 双方的分工和协调,日方在安多和那曲一带及唐古拉冰川同样设置了边界层观测基地,并在安多和那曲之间安装一台 Doppler 雷达进行高原降水特征和小尺度风场探测。双方还共同支持在五道梁原中科院高原大气物理研究所现有气象塔设施基础上开展近地面层辐射平衡、湍流通量和廓线观测。GAME/Tibet 各观测基地增强了南北剖面的观测,又分别代表高山荒漠(五道梁)、类型稍有不同的高寒草原(安多和那曲)和冰川(唐古拉山),使大气边界层特殊观测所代表的气候特征和地表类型更为完整。

### 1.3.5 加密观测试验期

地面和探空及辐射的加密观测时间:1998 年 5 月 10 日~8 月 10 日。

边界层特殊观测:分一般观测期和加密观测期两种,日期见表 1.2。两者的差别是,加密观测期安排人工操作量大的系留气球和低空探空(当雄)的加密观测。选择代表湿季开始前和开始后不同期间,并力求三地同步。因阿里地区冬季降雪多,道路无法通行,改则一般观测期往后顺延。昌都基地为取得整个夏季的资料,观测日数多于其他两地。

## 1.4 高原边界层观测技术系统

高原大气边界层地-气过程的观测以地面湍流和辐射通量、温度、湿度和风廓线及地中热量和水分状态三方面为主要内容。其中边界层 Doppler 声雷达探测可以同时提供垂直速度、 $C_2^2$  等边界层湍流结构的产品。此外根据设备条件,三个基地还分别开展了气溶胶、太阳辐射光谱、地面二氧化碳通量、激光雨量计测量和全天云照相等附加观测。各站观测项目和资料获取情况见表 1.3。下面从近地面湍流和辐射通量及边界层探测的角度简要阐明观测项目设置的意义和相应的仪器技术指标。

### 1.4.1 湍流观测系统

改则站湍流观测采用的是中科院大气物理所研制的多层传感器同步观测系统。这是国内首次在高原野外观测实验中,架设三层超声风速仪、三层温度脉动仪、一层湿度脉动仪进行同步梯度观测(湍流场观测仪器见表 1.4)。

表 1.3 边界层观测项目及设备

类别	观测项目	观测内容	观测方法或仪表	观测点及设置情况		
				改则	当雄	昌都
				55248	55299	56137
下垫面水热过程观测	2	土壤温度	电阻或热敏电阻温度表	6层	6层	6层
	3	土壤水分观测	称重法	1	1	1
	4	土壤热通量观测	热流板观测仪(四处平均)	1	1	1
	5	降水量观测	光学雨量计、翻斗雨量计	1	1	1
廓线和通量观测	6	观测平台	6层铁塔 10~16m 或 7层铁塔 20m	1	1	1
	7	温度、湿度、风速廓线	电阻温度表	7层		6层
			湿敏电容	7层		6层
			三杯风速计	7层	6层	6层
			翻转式 $\Delta T$ 、 $\Delta q$ 系统		1套	
	8	风向	风标风向仪	2层	1层	1层
	9	脉动和湍流通量观测	超声风速仪	2层	1层	1层
			Lyman-Alpha 或红外湿度仪、湿敏电容	2层	1层	1层
			细丝温度仪	2层	1层	1层
边界层结构观测	10	声遥感法探测 (V、D、T 廓线)	RASS 廓线仪 Doppler 声雷达	1	1	1
	12	系留汽艇探测 (V、D、T、q 廓线)	系留汽艇探测系统	1	1	1
	13	低空探空	低空探空仪		1	
辐射观测	14	地面辐射探测	短波辐射表 (向上、向下探头)	1	1	1
			长波辐射表 (向上、向下探头)	1	1	1
			直接辐射表	1	1	1
			散射辐射表	1	1	1
其他	15	全天云观测	鱼眼照相机		1	
	16	气溶胶观测 (总量和分级采样)	气溶胶采样分析		1	

表 1.4 大气湍流测量仪器

仪器名称和型号	主要技术指标	用途	架设高度
超声风速温度仪 UAT-1	测量范围: 风速: 0~30m/s 温度: -20~50 C 分辨率: 风速: $\pm 0.01$ m/s 温度: $\pm 0.01$ C 精度: 风速: $\pm 2\%$ 温度: $\pm 1\%$ 风向: $\pm 0.1$ C 采样速率: 20Hz	测量 $U, u', v', w', T'$	2.85m 5.85m 15.85m
温度脉动仪	采样速率: 20Hz 精度: 0.01 C 分辨率: 0.005 C	测量 $T'$	2.57m, 5.57m, 15.57m
湿度脉动仪 AIR-HA-IPX	测量范围: 0~100% 精度: $\pm 2\%$ 采样速率: 10Hz	测量 $q'$	2.57m